

doi: 10.33249/2663-2144-2019-84-11-92-100

UDC 621.31: 535-2

FEATURES OF DESIGNING AND OPERATION OF PHOTOELECTRIC SYSTEMS**O. Sokolovskyi¹, D. Stupac²**

e-mail: olehsokolovskyi@gmail.com, dimas1971@ukr.net

¹Zhytomyr National Agroecological University

7, Stary Blvd, Zhytomyr, 10008, Ukraine

²Zhytomyr Military Institute

22, Prospect Myru, Zhytomyr, 10004, Ukraine

The current stage of economic development requires the use of modern service functions, which must provide the necessary technological parameters, reliability and energy efficiency of alternative sources. Operation of photovoltaic systems is subject to the peculiarities of the technological process of solar energy conversion. The purpose of this work is to analyze the capabilities of modern services based on the practical experience of the installers. The study is based on computer simulation, network technologies and features of photovoltaic power plants. The experience of operating solar stations confirms the importance of specialized resources and the feasibility of remote monitoring. This will ensure maximum installation performance. The use of modern service functions greatly simplifies the construction of a photovoltaic station and allows you to perform monitoring using network technologies. Design of a power plant with an installed capacity of 33 kW was carried out. The station operates in parallel with the network. The project was implemented using the ABB Stringsizer tool. The system generates electricity of more than 34000 kWh. This provides a profit of UAH 150000 in green tariff. Reliability indicator is a systematic control of equipment. Leading manufacturers of solar inverters have convenient services. This allows remote monitoring without visiting the facility. The Aurora Vision platform provides continuous analysis of a solar power plant. The platform uses modern means of visualizing system parameters. Aurora Vision is monitored using a wireless connection and a wired LAN connection. A secure portal Plant Management Platform has been created for data storage. To eliminate errors, you need a modern hardware-software complex. It allows you to restore the system. Aurora Manager Lite allows you to read errors and install software on any inverter in-house. Further research is recommended to investigate the features of conventional and microinverter technologies to determine the priority option for roof and ground layout.

Key words: photovoltaic system, green tariff, remote monitoring.

ОСОБЛИВОСТІ ПРОЄКТУВАННЯ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ**О. Ф. Соколовський¹, Д. Є. Ступак²**

e-mail: olehsokolovskyi@gmail.com, dimas1971@ukr.net

¹Житомирський національний агроєкологічний університет

бульвар Старий, 7, м. Житомир, 10008, Україна

²Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова

проспект Миру, 22, м. Житомир, 10004, Україна

Нинішній етап економічного розвитку вимагає використання сучасних сервісних функцій, які повинні забезпечувати необхідні технологічні параметри, надійність та енергоефективність альтернативних джерел. Експлуатація фотоелектричних систем пов'язана з низкою вимог, що підпорядковуються особливостям технологічного процесу. Метою роботи є аналіз можливостей сучасних сервісів для забезпечення надійної роботи станцій на основі практичного досвіду інсталяторів. Дослідження побудовано на базі комп'ютерного моделювання, мережових технологій з врахуванням особливостей функціонування фотоелектричних станцій. Досвід експлуатації сонячних станцій підтверджує важливість застосування спеціалізованих ресурсів та доцільність віддаленого моніторингу з метою забезпечення максимальної продуктивності установки. Використання сучасних

сервісних функцій значно спрощує побудову структури фотоелектричної станції та дозволяє виконувати діагностику установки за допомогою мережесевих технологій. Проведено проектування електростанції на прикладі установки із встановленою потужністю 33 кВт, призначеної для паралельної роботи з мережею. Реалізація проекту здійснена за допомогою інструменту Stringsizer компанії ABB. Відповідно до розрахунків система може виробити за календарний рік понад 34000 кВт·год електроенергії, що забезпечить 150000 грн надходжень за зеленим тарифом. Важливим критерієм надійної експлуатації установки є систематичний контроль стану обладнання. Провідні виробники сонячних інверторів мають у своєму арсеналі зручні сервіси, які дозволяють проводити віддалений моніторинг без потреби виїзду на об'єкт. Зокрема, платформа Aurora Vision компанії ABB виконує безперервний комплексний аналіз стану сонячної електростанції з використанням сучасних засобів візуалізації основних параметрів системи. Реалізація моніторингу Aurora Vision відбувається через мережу Інтернет як за допомогою бездротового підключення, так і дротового з'єднання LAN. З метою збереження даних компанією ABB створено захищений портал Plant Management Platform. Для усунення програмних помилок інстальатор повинен мати у своєму розпорядженні сучасний програмно-апаратний комплекс, який дозволяє відновити працездатність системи. Зокрема, ABB Aurora Manager Lite дозволяє здійснювати зчитування помилок та виконувати повторну інсталяцію програмного забезпечення на будь-який інвертор власного виробництва. Подальші дослідження рекомендується направити на вивчення особливостей застосування звичайних та мікроінверторних технологій з метою визначення пріоритетного варіанту у випадку дахового та наземного розташування.

Ключові слова: фотоелектрична система, зелений тариф, віддалений моніторинг.

Вступ

Нинішній етап економічного розвитку вимагає використання сучасних сервісних функцій, які повинні забезпечувати необхідні технологічні параметри, надійність та енергоефективність альтернативних джерел. Застосування спеціалізованих програмних продуктів дозволить визначити оптимальну конфігурацію системи, вчасно виявити потенційні проблеми та забезпечити безперебійну роботу протягом всього терміну експлуатації установки.

Більшістю світових виробників сонячних інверторів розроблені спеціалізовані онлайн ресурси, які дозволяють швидко та просто визначати склад системи, проводити діагностику сонячної електростанції, здійснювати аналіз і порівняння даних у режимі реального часу та презентувати дані в зручному форматі. Запорукою успішної експлуатації фотоелектричної системи є визначення оптимальної конфігурації з врахуванням географічного розташування, орієнтації та кута нахилу панелей, типу розміщення (наземне чи дахове), затінення, властивостей обладнання (Delucchi et al., 2011; Kovalev et al., 2015; Robert et al., 2017). Важливо, щоб всі панелі на одній ділянці були розташовані під однаковим кутом.

Кут падіння сонячних променів відносно горизонталі змінюється у залежності від пори року. Для північних районів України цей кут складає в середньому 33 градуси (Skydan et al., 2018). Постачальники сонячних електростанцій пропонують спеціалізоване програмне забезпечення, яке полегшує визначення параметрів та дозволяє уникнути помилок під час проектування майбутньої станції. Заслужують на увагу програми Solarconfigurator (Fronius), Sunnydesignweb (SMA Solar Technology), Solar Edge Smart Designer (Solar Edge), Stringsizer (ABB), Kostal Piko Plan (Kostal), Smartdesign (Huawei) та інші.

Матеріали та методи

Експлуатація фотоелектричних систем пов'язана з низкою вимог, що підпорядковуються особливостям технологічного процесу. Реалізація відповідних завдань неможлива без визначення оптимальної конфігурації та віддаленого моніторингу таких об'єктів. Під час розробки та експлуатації недостатня увага приділена використанню інструментів, які дозволяють уникнути значних втрат через неврахування особливостей сонячних електростанцій. Метою роботи є аналіз можливостей сучасних сервісів для забезпечення надійної роботи станцій на основі практичного досвіду інстальаторів.

Об'єктом дослідження є засоби проектування та діагностики об'єктів сонячного електропостачання. Дослідження побудовано на базі комп'ютерного моделювання, мережевих технологій із врахуванням особливостей функціонування фотоелектричних станцій.

Результати досліджень та обговорення

Засоби моделювання фотоелектричних станцій мають інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, що дозволяє без особливих проблем освоїти програмний продукт будь-якого з виробників інверторного обладнання. Зокрема, інструмент конфігурації ABB Stringsizer – це безкоштовний веб-ресурс, який дозволяє проєктувальникам визначити оптимальні параметри стрінгів фотоелектричних модулів для інверторів компанії

(ABB, 2019). На початку роботи необхідно вказати країну розташування для отримання модельного ряду інверторів відповідно до експортної політики компанії. Дотримання допустимої величини напруги в колі постійного струму забезпечується вибором нижньої межі температурного діапазону, за якого буде експлуатуватись майбутня система. Програма автоматично вишукує з власної бази параметри фотоелектричного перетворювача, вказаного користувачем, та розраховує всі можливі конфігурації системи для конкретного інвертора. Оптимальні варіанти будуть розташовані в зеленому полі, всі інші – в жовтому та коричневому. Програма пропонує обрати незалежне або паралельне застосування трекерів.

5 - RESULTS - All results shown are allowed configurations, please select the box with desired string configuration

PARALLEL MPPT
Number of independent MPPT: 1

		PV Panels/string													
		6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Single MPPT	Strings in parallel	1													
	2														
	3														
	4														
Notes															
Number of panels:															
Inverter utilization ratio:															
DC installed Power:															

INDEPENDENT MPPT
Number of independent MPPT: 2

		PV Panels/string													
		6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
MPPT1	Strings in parallel	1													
	2														
	3														
	4														
Notes															
Number of panels:															
DC installed Power:															

MPPT2

		PV Panels/string													
		6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
MPPT2	Strings in parallel	1													
	2														
	3														
	4														
Notes															
Number of panels:															
DC installed Power:															

Рис. 1. Конфігурація системи в середовищі Stringsizer

На рисунку 1 зображено результати моделювання системи з інвертором TRIO-27.6-TL-OUTD (ABB, 2019) та панелями Yingli Solar YGE 72 Cell Series 2 (Yingli Solar, 2019) в середовищі Stringsizer. Так, в одному з варіантів конфігурації майбутньої системи програма пропонує застосувати 96 панелей, розподілених на шість стрінгів та рівномірно приєднаних до двох незалежних трекерів. За необхідності отриману інформацію можна зберегти у зручному форматі для подальшого використання.

Потенційні можливості розрахованої системи можна оцінити за допомогою онлайн калькуляторів, розміщених на сайтах виробників

та дистриб'юторів сонячних установок.

Загалом величину сонячної радіації, яка потрапляє на похилу площину, можна визначити за формулою (Skydan et al., 2018):

$$Q_{\Pi} = Q_{\Pi P} + Q_P + Q_B$$

де $Q_{\Pi P}$ – пряме сонячне випромінювання, яке потрапляє на похилу площину; Q_P – розсіяне сонячне випромінювання, яке потрапляє на похилу площину; Q_B – випромінювання, відбите від поверхні землі.

Значення прямого сонячного випромінювання знаходять за виразом:

$$Q_{\text{пп}} = Q_{\text{опт}} \cos \theta$$

де $Q_{\text{опт}}$ – пряме сонячне випромінювання, яке падає на ортогональну площину, відносно променів; θ – кут прямого сонячного випромінювання, який характеризує кут між напрямом випромінювання на будь-яку поверхню і нормаллю до цієї поверхні.

Згідно з формулою Кастрова:

$$Q_{\text{опт}} = \frac{Q_0 \sin \alpha}{\sin \alpha + c}$$

де Q_0 – сонячна стала; α – кут, що визначає висоту сонця; c – безрозмірна величина, яка характеризує ступінь прозорості атмосфери.

Кут падіння прямого сонячного випромінювання можна знайти із виразу:

$$\cos \theta = \sin \delta \sin \varphi \cos s - \sin \delta \cos \varphi \sin s \cos \gamma + \cos \delta \cos \varphi \cos s \cos \omega + \cos \delta \sin \varphi \sin s \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin s \sin \gamma \sin \omega$$

де φ – географічна широта місця; δ – характеризує кутове положення сонця в сонячний день відносно площини екватора; s – кут нахилу площини, що досліджується, до горизонту; γ – азимутний кут площини, який характеризує відхилення нормалі до площини від місцевого меридіану; ω – часовий кут, який визначає кутовий зсув Сонця протягом доби.

Значення нахилу Сонця можна знайти за наближеною формулою Купера:

$$\delta = 0,41 \sin \left(\frac{360(284 + N)}{365} \right)$$

де N – порядковий номер дня в році, який бере відлік від першого січня. Висоту сонця можна визначити із виразу:

$$\sin \alpha = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega$$

Азимут сонця:

$$\cos \beta = \frac{\sin \alpha \sin \varphi - \sin \delta}{\cos \alpha \cos \varphi} \operatorname{sign}(\varphi)$$

Значення розсіяного сонячного

випромінювання:

$$Q_p = Q_{\text{рг}} [0,55 + 0,434 \cos \theta + 0,313 (\cos \theta)^2]$$

де $Q_{\text{рг}}$ – потік сонячної енергії, яка падає на горизонтальну поверхню. Згідно з формулою Берлаге:

$$Q_{\text{рг}} = \frac{1}{3} (Q_0 - Q_{\text{опт}}) \sin \alpha$$

Випромінювання, відбите від поверхні землі, має дуже невелике значення і ним можна знехтувати.

Величина сонячної радіації, яка потрапляє на похилу площину:

$$Q_{\text{п}}(\varphi, \omega, \gamma, s, N) = Q_{\text{пп}}(\varphi, \omega, \gamma, s, N) + Q_p(\varphi, \omega, s, N)$$

Для того щоб врахувати зменшення потоку випромінювання за рахунок хмарності, можна використати коефіцієнти a , b , n , де a – коефіцієнт, який залежить від середовища (суша чи море) та від широти місця; b – сталий коефіцієнт; n – хмарність в долях одиниці.

Тоді вираз для розрахунку сонячної радіації, яка падає на довільний майданчик в умовах хмарності, матиме вигляд:

$$Q_{\text{п}}(\varphi, \omega, \gamma, s, N) = [Q_{\text{пп}}(\varphi, \omega, \gamma, s, N) + Q_p(\varphi, \omega, s, N)] \cdot [1 - (a + bn)n]$$

Таким чином, якщо задавати кути орієнтації майданчика γ і s , можна визначити величину сонячної радіації для будь-якого дня року та

моменту часу. Для визначення питомої добової енергії, яка надходить до похиленого майданчика, необхідно провести інтегрування відповідно до

виразу:

$$Q_{\text{ДОБ}}(N) = \frac{12}{\pi} \int_{\omega_k}^{\omega_n} Q_{\Pi}(\varphi, \omega, \gamma, s, N) d\omega$$

де ω_n , ω_k – часові кути, які відповідають моментам часу початку і закінчення процесу опромінювання поверхні.

Визначальними факторами для отримання максимальної продуктивності є кут нахилу та орієнтація модулів (Calcabrini et al., 2019; Smith et al., 2011). На рисунку 2 зображено результати розрахунків установки із встановленою потужністю фотомодулів 33 кВт, зорієнтованих

на південь та кутом нахилу до горизонталі 30 градусів (Atmosfera, 2019). На рисунку: W_n , W_r – відповідно графік витрат на потреби домогосподарства та графік виробленої електроенергії. За календарний рік станція здатна виробити понад 34000 кВт·год електричної енергії. Річна економія коштів на власне споживання становитиме понад 2000 грн. Вартість електроенергії, реалізованої за зеленим тарифом, складе 150000 грн. Економія щорічно зростатиме на 9,45 % відносно попереднього періоду із врахуванням деградації модуля в межах 0,5 % та прогнозованого зростання вартості електроенергії на 10 %.

Графік виробленої енергії за календарний рік апроксимується рівнянням:

$$W_r = 0,091t^5 + 1,665t^4 - 79,61t^3 + 610,5t^2 - 651,3t + 1047$$

Достовірність апроксимації:

$$R^2 = 0,992$$

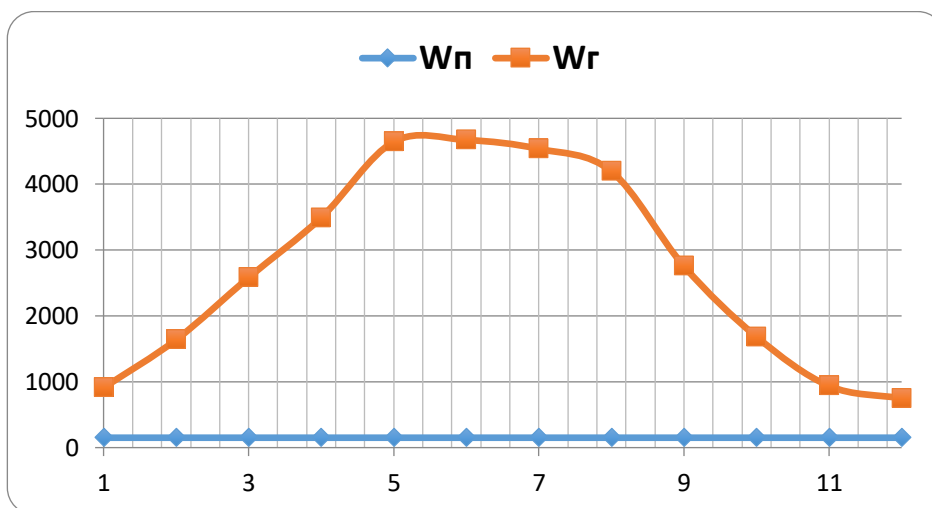


Рис. 2. Показники сонячної електростанції потужністю 33 кВт

Найважливішими функціями віддаленого моніторингу сонячних електростанцій є наглядна візуалізація, оцінка величини генерації та доходу. У режимі реального часу можна отримувати поточні дані напруги, струму та інших електричних величин, стан системи, кількість виробленої енергії за визначені проміжки часу, інформацію про погоду за географічними координатами конкретного об'єкта тощо.

Обов'язковою умовою для отримання розширеного гарантійного обслуговування є реєстрація сонячної станції на інтернет-ресурсі виробника. Найбільш популярними серед інсталяторів є програми Solar Web (Fronius), Sunny Portal (SMA), Solar Edge Monitoring Portal (Solar Edge), Aurora Vision (ABB), Kostal Demo Piko (Kostal), NetEco (Huawei) тощо. Зокрема, компанія Fronius, за умови реєстрації

інвертора на спеціалізованому сайті та підключенні до моніторингу, надає розширену міжнародну гарантію на 7 років, стандартна гарантія – 5 років (Fronius, 2019).

Платформа управління Aurora Vision – це хмарна технологія, що використовується для розширення можливостей моніторингу сонячних електростанцій з інверторами ABB. Aurora Vision пропонує декілька способів контролю та керування. Plant Viewer – простий браузер для перегляду інформації за допомогою мобільних пристроїв на базі IOS, Android (Plant Viewer,

2019). Plant Portfolio Manager – середовище, що використовується операторами та інсталяторами для моніторингу та управління портфоліо сонячної електростанції з комп'ютера чи ноутбука. На рисунку 3 зображено графік виробленої енергії в середовищі Plant Portfolio Manager. За допомогою Plant Portfolio Manager зручно аналізувати параметри на виході інвертора з метою подальшого визначення стану мережі особливо на початковій стадії експлуатації установки.



Рис. 3. Графік виробленої енергії в середовищі Plant Portfolio Manager

У випадку значного зростання напруги, яке супроводжується обмеженням потужності інвертора, необхідно вжити заходів щодо зменшення опору петлі "фаза-нуль" або

зниження вихідної напруги силового трансформатора. На рисунку 4 зображено графік виробленої енергії під час роботи інвертора на мережу з підвищеним опором.

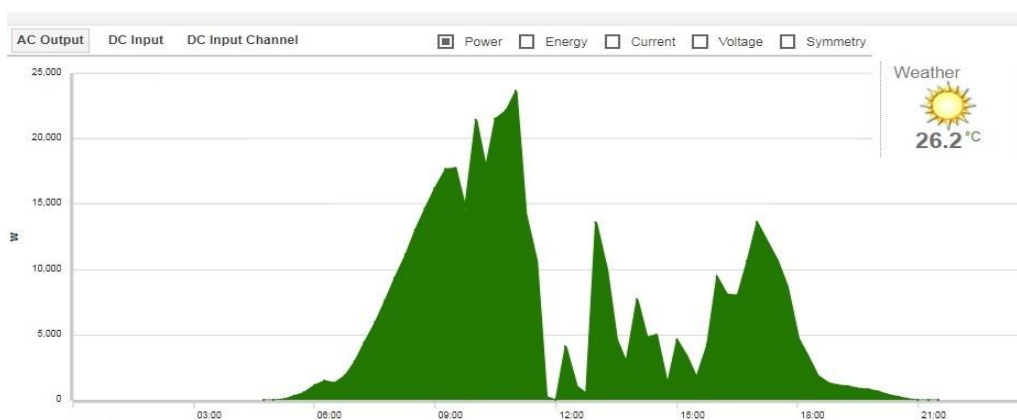


Рис. 4. Графік продуктивності в умовах підвищеного опору мережі

За допомогою віддаленого моніторингу вдалося встановити причину низької продуктивності установки та аргументувати необхідність покращення параметрів мережі у

зверненні до енергопостачальної організації. На рисунку 5 зображено графік продуктивності установки після усунення несправностей на ділянці інвертор – трансформатор.

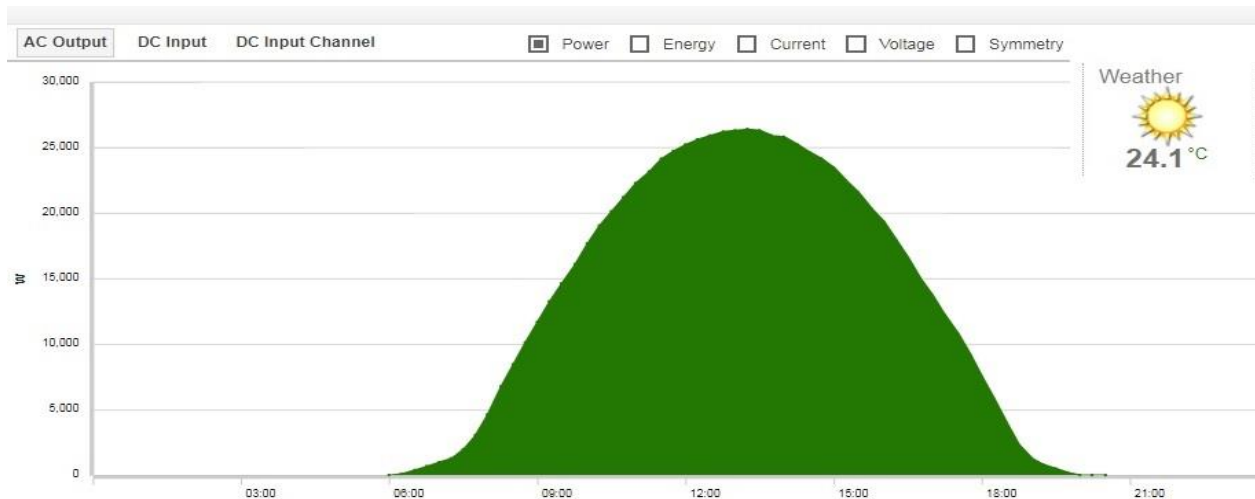


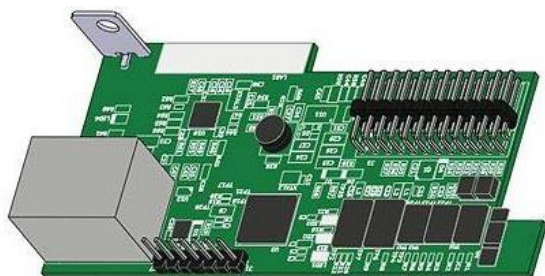
Рис. 5. Графік продуктивності після налаштування мережі

Plant Portfolio Manager включає всі інструменти, необхідні для налаштування, встановлення, функціонування та адміністрування портфоліо сонячної електростанції, включаючи контроль інверторів, ресстраторів, метеостанцій та датчиків, управління акаунтами, інструменти усунення несправностей та звітність. Оператори та інвестори можуть застосовувати засоби віддаленої діагностики, спільно вирішувати проблеми сонячної електростанції, одночасно зменшуючи необхідність віддалених відвідувань.

Також налаштування забезпечують власникам можливість приватного моніторингу. Це дозволяє здійснювати адміністрування станції без стороннього втручання.

API Aurora Vision – веб-версія, яка використовується для візуалізації, корегування та оновлення інформації в портфоліо установки.

Для реалізації моніторингу Aurora Vision застосовують модулі VSN300 для малих станцій та VSN700 для промислових об'єктів. Зображення пристроїв представлено на рис. 6.



VSN 300



VSN 700

Рис. 6. Зображення пристроїв віддаленого моніторингу

Зокрема, плата VSN300 може працювати у двох режимах. Access Point Mode передбачає тільки локальний моніторинг. У цьому випадку плата функціонує як точка доступу, до якої користувач може підключитися локально. Station Mode (режим станції) забезпечує локальний та віддалений моніторинг.

Загалом користувачі Aurora Vision можуть ділитися із співробітниками та бізнес-партнерами ключовими інструментами, необхідними для управління сонячною енергією, включаючи адміністрування активів, перегляд стану пристроїв, огляд операційних проблем, доступ до звітів клієнтами та відділами технічної підтримки. Усі продукти Aurora Vision повністю інтегровані, щоб працювати синхронно та надавати зацікавленим сторонам необхідну

інформацію. Моніторинг з браузера та мобільних пристроїв виконується безкоштовно для всіх зареєстрованих інверторів ABB. Підключення до мережі Інтернет виконується за допомогою бездротового підключення WLAN. Підтримуються стандарти IEEE 802.11b/g/n (2,4 ГГц), Modbus, TCP (SCADA), SunSpec.

У разі виникнення труднощів із стабільною роботою інвертора важливим інструментом виступає середовище Aurora Manager Lite. За допомогою Manager Lite здійснюється перепрошивання пристрою для усунення програмних помилок та відновлення повноцінного функціонування всієї системи. Вигляд головного вікна програми зображено на рисунку 7.

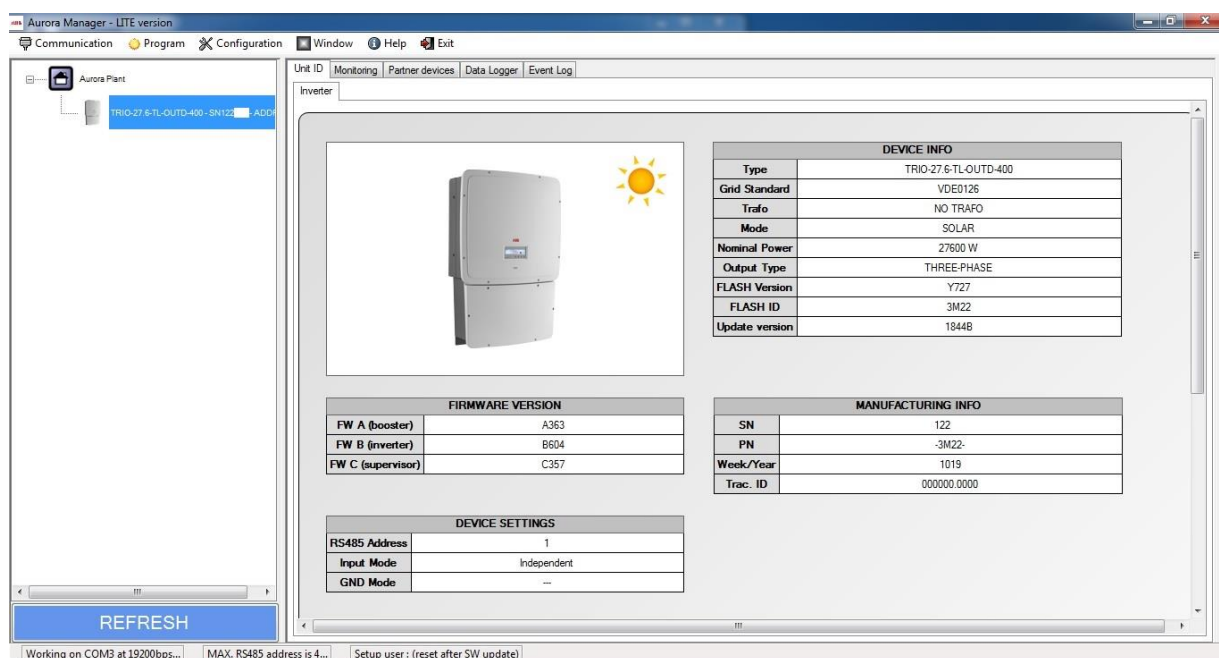


Рис. 7. Вікно інтерфейсу Aurora Manager Lite

Перед використанням програма має бути інстальована на ноутбук. Приєднання ноутбука до інвертора відбувається за допомогою перетворювача RS485/USB. Також Manager Lite дозволяє отримати логи для подальшого аналізу помилок під час роботи інвертора та виконує автоматичне призначення адрес інверторів, підключених до шини RS485. Журнал подій можна також спостерігати під час проведення локального моніторингу.

Висновки

Застосування спеціалізованих онлайн ресурсів створює передумови визначення оптимальної конфігурації майбутньої системи, дозволяє інсталяторам вирішувати повсякденні завдання, допомагає вчасно виявляти помилки та забезпечує безвідмовну роботу установки. Можливості сучасного моніторингу дозволяють здійснювати повноцінну діагностику станції протягом всього терміну експлуатації та

оперативно реагувати на виникнення позаштатних режимів. Якісний сервіс об'єктів розподіленої генерації зменшує кількість аварійних режимів у мережах, що сприяє надійності електропостачання споживачів у цілому.

Подальші дослідження рекомендується направити на вивчення особливостей застосування звичайних та мікроінверторних технологій з метою визначення пріоритетного варіанту у випадку дахового та наземного розташування.

References

- Atmosfera (2019). Kalkulator soniachnoi elektroenerhii [Solar electricity calculator]. Retrieved from <https://www.atmosfera.ua/uk/sonyachni-elektrostancii/kalkulyator-sonyachnoi-elektrostancii/> [in Ukrainian].
- Calcabrini, A., Ziar, H, Isabella, O. & Zeman, M. (2019). A simplified skyline-based method for estimating the annual solar energy potential in urban environments. *Nature Energy*, 2019, 4, 206–215. doi: 10.1038/s41560-018-0318-6.
- Delucchi, M. & Jacobson, M. (2011). Providing all global energy with wind, water, and solar power: Reliability, system and transmission costs, and policies. *Energy Policy*, 2, 1170–1190. doi: 10.1016/j.enpol.2010.11.045.
- Fronius (2019). *Solar energy*. Retrieved from <https://www.fronius.com/en>.
- Kovalov, O. V. & Ratushnyi, O. V. (2015). *Alternatyvni dzherela enerhii Ukrainy* [Alternative energy sources of Ukraine]. Sumy : SumDU [in Ukrainian].
- Plant Viewer (2019). *Solar energy*. Retrieved from <https://easyview.auroravision.net/easyview/#home>.
- Robert, L. & Michael, E. (2017). The impacts of storing solar energy in the home to reduce reliance on the utility. *Nature Energy*, 2, 17001. doi: 10.1038/nenergy.2017.1.
- Skydan, O. V., Holub, H. A., Kukharets, S. M., Yarosh, Ya. D., Chuba, V. V., Medvedskyi, O. V. ... Kukharets, V. V. (2018). *Vidnovliuvana enerhetyka v ahrarnomu vyrobnytstvi* [Renewable energy in agricultural production]. Kyiv : NUBiP Ukrainy [in Ukrainian].
- Smith, J., Sunderman, W., Dugan, R. & Seal, B. (2011, 20–23 March). Smart inverter volt/var control functions for high penetration of PV on distribution systems. *Power Systems Conference and Exposition : Conference Paper* (p. 349). Phoenix, AZ, USA : IEEE. doi: 10.1109/psce.2011.5772598.
- Yingli Solar (2019). *Solar energy*. Retrieved from <https://yinglisolar.com>.
- ABB Solar (2019). *Solar energy*. Retrieved from <http://stringsizer.abb.com/>.